

Drying Kinetics and Modelling of Butterfly Pea Flower with Hot Air

*Mongkolchai Kampagdee, Virat Whangkuanklang and Karan Homchad

Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Isan.

*Corresponding author: chai_mechainics@hotmail.com

Received
06/02/2024

Reviewed
15/04/2024

Revised
29/04/2024

Accepted
29/04/2024

Abstract

This research investigated the chemical kinetics, drying rate, specific energy consumption, and mathematical modeling of butterfly pea flower drying. The conditions of the drying tests include three levels of hot air temperature (50, 60, and 70°C) and two levels of air velocity (1 and 2 m/s). The results showed that hot air temperature and air velocity affect the drying of butterfly pea flowers. The drying time decreased with increasing temperature and velocity. The average drying rate was 62 % at 60°C and increased to 84% at 70°C. The best performance for the specific energy value was drying butterfly pea flowers at 70°C hot air temperature with 2 m/s air velocity. Hence, the value equals 16 % compared to the highest specific energy value of drying. The drying rate of butterfly pea flowers increased when the temperature and velocity increased. The results of the mathematical model prediction of the butterfly pea flower drying showed that the Wang and Singh equations were the best predictors of drying results, with R^2 values between 0.987970239 to 0.994963057 and χ^2 values between 0.006830940 to 0.009775177.

Keyword: Butterfly pea flowers; Hot air drying; Specific energy consumption; Mathematical Modeling

จลนพลศาสตร์การอบแห้งและแบบจำลองคณิตศาสตร์ สำหรับการอบแห้งดอกอัญชันด้วยลมร้อน

*มงคลชัย คำปากดี วิรัตน์ หวังเขื่อนกลาง และการันย์ หอมชาติ

สาขาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลอีสาน

*ผู้นิพนธ์หลัก: chai_mechainics@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษา จลนพลศาสตร์ อัตราการอบแห้ง พลังงานไฟฟ้าจำเพาะ และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งดอกอัญชัน ด้วยเงื่อนไขการทดลองอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70 °C และความเร็วลมอบแห้ง 2 ระดับ คือ 1 และ 2 m/s ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิลมร้อนและความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการอบแห้งดอกอัญชัน โดยระยะเวลาอบแห้งลดลงเมื่ออุณหภูมิและความเร็วเพิ่มสูงขึ้น โดยมีอัตราการอบแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 62 % ที่อุณหภูมิ 60 °C และเพิ่มขึ้น 84 % ที่อุณหภูมิ 70 °C สำหรับค่าพลังงานจำเพาะการอบแห้งดอกอัญชันที่อุณหภูมิลมร้อน 70 °C รวมกับความเร็วลม 2 m/s มีค่าน้อยที่สุด มีค่าพลังงานจำเพาะเท่ากับ 16 % เมื่อเปรียบเทียบกับค่าพลังงานจำเพาะอบแห้งสูงสุด โดยอัตราการอบแห้งดอกอัญชันจะมีค่ามากขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมเพิ่มขึ้น สำหรับผลการทำนายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์การอบแห้งดอกอัญชันพบว่า สมการ Wang and singh สามารถทำนายผลการอบแห้งได้ดีที่สุด มีค่า R^2 ระหว่าง 0.987970239 ถึง 0.994963057 และค่า χ^2 มีค่าระหว่าง 0.006830940 ถึง 0.009775177

คำสำคัญ: ดอกอัญชัน; การอบแห้งด้วยลมร้อน; ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ; แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

บทนำ

ดอกอัญชัน มีชื่อวิทยาศาสตร์ (*Clitoria ternatea L.*) เป็นพืชเขตร้อนมีการปลูกทั่วไปทุกภูมิภาคในประเทศไทย สามารถนำมารับประทานและทำเป็นยาสมุนไพร ซึ่งพบว่า ดอกอัญชันมีฤทธิ์กระตุ้นการเรียนรู้ ช่วยคลายเครียด ลดน้ำตาลในเลือด แก้ไข และลดการอักเสบ นอกจากนี้ยังใช้ทำเครื่องสำอาง และมีฤทธิ์ต้านสารอนุมูลอิสระ ดังนั้นดอกอัญชันจึงถูกนิยมนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย ดอกอัญชันสดไม่สามารถเก็บไว้นานได้เนื่องจากปริมาณความชื้นสูงทำให้เกิดเชื้อราได้ง่าย จึงนิยมนำมาแปรรูปดอกอัญชันแห้งเพื่อสามารถเก็บรักษาได้นานและยังเป็นการเพิ่มมูลค่าอีกด้วย (Havananda, T. & Leungwliai, K., 2019)

การอบแห้งเป็นเทคนิคการถนอมอาหารที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายและมีด้วยกันหลายวิธีการอบแห้งด้วยการพาความร้อนเป็นวิธีหนึ่งที่ยึดตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความชื้นในอาหารให้อยู่ในระดับที่สามารถเก็บรักษาได้นาน และอาหารต้องคงรสชาติ ลักษณะและคุณค่าอาหารให้ได้มากที่สุด ดังนั้นเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญมากในการถนอมอาหารด้วยกระบวนการอบแห้ง (Zhao, R. & Gao, T., 2016).

การอบแห้งเป็นกระบวนการที่มีกลไกซับซ้อน ดังนั้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จึงมีความจำเป็นสำหรับการศึกษาเงื่อนไขการอบแห้งเพิ่มเติม เพื่อหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ดังนั้นการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการอบแห้งดอกอัญชันด้วยลมร้อน และใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับหาเงื่อนไขการอบแห้งที่เหมาะสมสำหรับดอกอัญชัน เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับออกแบบและสร้างเครื่องอบแห้งดอกอัญชันต่อไป

วิธีการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุทดลอง

ดอกอัญชันสำหรับทดลองอบแห้ง คือดอกอัญชันสายพันธุ์เทพรัตน์ไพริน 63 จากอำเภอกุฉินารายณ์ จังหวัดนครราชสีมา การเตรียมดอกอัญชันสำหรับทดลอง ดอกอัญชันจะถูกนำมาวางตากลมให้แห้งในที่อากาศถ่ายเทได้ดี โดยใช้เวลาดตากลม 30 min จากนั้นนำตัวอย่างไปหาค่าความชื้นเริ่มต้นด้วยเตาอบแบบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 °C นาน 24 hr ตามมาตรฐาน Association of Official Agricultural Chemists (AOAC)

2. วิธีการทดลอง

2.1 ทำการตั้งค่าเงื่อนไขการทดลองอบแห้ง จากนั้นเปิดเครื่องอบแห้งแบบลมร้อนเพื่ออุ่นห้องอบแห้งโดยใช้เวลา 15 min เพื่อให้ห้องอบแห้งมีค่าอุณหภูมิและความเร็วลมคงที่

2.2 ดอกอัญชันมีความชื้นเริ่มต้น 90 %wb ทำการทดลองอบแห้งดอกอัญชัน 60 g เริ่มต้นอบแห้งใช้ระยะเวลาอบแห้ง 30 min เมื่อครบกำหนดตัวอย่างจะถูกนำออกมาชั่งน้ำหนักและทำการบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักดอกอัญชัน เพื่อนำค่าน้ำหนักที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการ

อบแห้ง จากนั้นนำดอกอัญชันเข้าห้องอบเพื่อทำการอบแห้งด้วยเวลา 30 min อีกครั้ง ทำซ้ำเช่นนี้จำนวน 6 ครั้ง เมื่อความชื้นสุดท้ายดอกอัญชันยังไม่ถึง 15 %wb ทำการเพิ่มระยะเวลาอบแห้งเป็น 1 hr เนื่องจากความชื้นในดอกอัญชันลดลงทำให้อัตราการอบแห้งลดลง เมื่ออบแห้งครบ 1 hr แล้วจึงนำตัวอย่างดอกอัญชันออกมาชั่งน้ำหนักและบันทึกผล นำดอกอัญชันเข้าห้องอบแห้งอีกครั้ง ทำการอบแห้งซ้ำเช่นนี้จนกระทั่งความชื้นสุดท้ายดอกอัญชันที่ค่าเท่ากับ 15 %wb

2.3 ทดลองอบแห้งดอกอัญชันตามเงื่อนไขขอบเขตของการวิจัย คือ อุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 70 °C อบแห้งร่วมกับความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1 และ 2 m/s จนกระทั่งครบตามเงื่อนไขการทดลอง

3. อุปกรณ์การทดลอง

Figure 1 แสดงส่วนประกอบเครื่องอบแห้งแบบพาลมร้อนประกอบด้วย 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 ห้องอบแห้งรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 cm มีทิศทางลมร้อนเข้าด้านล่างและออกทางด้านบนห้องอบแห้ง ส่วนที่ 2 ห้องแลกเปลี่ยนความร้อนประกอบด้วยตัวทำความร้อนแบบไฟฟ้า ขนาด 1 kW จำนวน 2 ตัว โดยมีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิในห้องอบแห้งแบบ PID สำหรับวัดอุณหภูมิอบแห้งที่ตำแหน่งทางเข้าห้องอบ ส่วนที่ 3 ประกอบด้วยพัดลมดูดอากาศมีมอเตอร์ 3 เฟส ขนาด 0.5 hp ควบคุมความเร็วรอบด้วยอินเวอร์เตอร์ และวัดค่าการใช้ไฟฟ้าด้วยมิเตอร์ Uni-T รุ่น UT200D ส่วนความเร็วลมให้เครื่องมือวัดความเร็วลมแบบฮอตไว testo รุ่น 405i

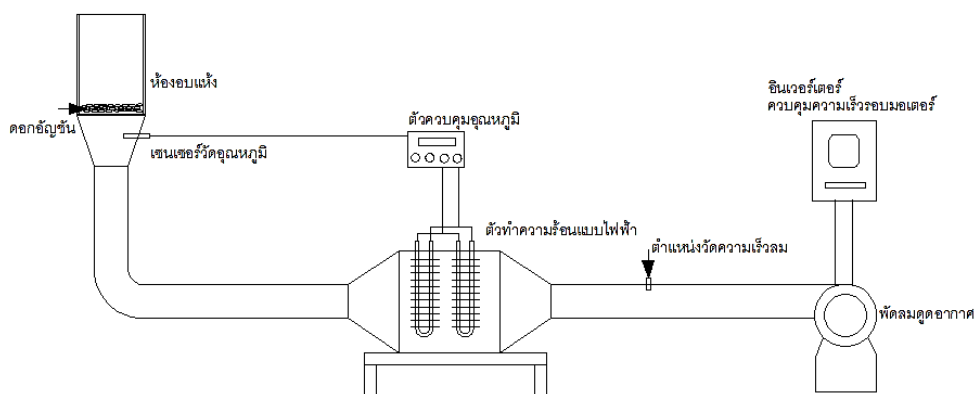


Figure 1 Schematic of hot air dryer.

4. การหาค่าความชื้นดอกอัญชัน

การวิเคราะห์หาค่าความชื้นของดอกอัญชัน สามารถหาได้จากสมการที่ 1 (Saniso, E. & Kasa, M., 2009)

$$M_w = \frac{w-d}{w} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ M_w คือความชื้น (%wb), w คือน้ำหนักเริ่มต้น (g), d คือน้ำหนักวัสดุแห้ง (g)

สำหรับการศึกษาจลนพลศาสตร์การอบแห้ง ในรูปอัตราส่วนความชื้น (Moisture ratio, MR) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 (Akpinar, E.K. et al., 2008)

$$MR = \frac{M_i - M_{eq}}{M_t - M_{eq}} \quad (2)$$

เมื่อ MR คือ อัตราส่วนความชื้น, M_i คือ ความชื้นเริ่มต้น (%wb), M_{eq} คือ ความชื้นสมดุล (%wb), M_t คือความชื้นที่เวลาใด ๆ (%wb)

เมื่อค่าความชื้นสมดุลมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นเริ่มต้นและความชื้นที่เวลาใด ๆ สามารถหาอัตราส่วนความชื้นได้จากสมการ 3 (Jalal, D. et al, 2018)

$$MR = \frac{M_i}{M_t} \quad (3)$$

พารามิเตอร์แบบจำลองการอบแห้งดอกอัญชัน ใช้วิธีการคำนวณแบบถดถอยไม่เชิงเส้น และใช้คอมพิวเตอร์ช่วยประมวลผลสำหรับหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และของไคสแควร์ (Chi-Square, χ^2) เพื่อใช้เปรียบเทียบระหว่างค่าผลที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการทำนายผลของแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ

Table 1 Mathematical model to describe drying kinetics.

ลำดับ	ชื่อสมการ	สมการ	อ้างอิง
1	Lewis	$MR = \exp(-kt)$	Kashaninejad et al.,
2	Page	$MR = \exp(-kt^n)$	Diamante et al. 2010
3	Henderson and pabis	$MR = a \exp(-kt)$	Akpinar et al., 2003
4	Logarithmic	$MR = a \exp(-kt)+c$	Togrul and Pehlivan,
5	Two trem	$MR = a \exp(-k_0t)+b \exp(-k_1t)$	Midilli et al., 2002
6	Verma et al.	$MR = a \exp(-kt)+(1-a)\exp(-gt)$	Doymaz, I., 2005
7	Wang and singh	$MR = 1+at+bt^2$	Wang and Singh, 1978

ค่า Correlation coefficient (R^2) หาได้จากสมการที่ 4 (Azmi, S.K. & Ibrahim, D., 2020)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - M_{pre})^2}{\sum_{i=1}^n (M_{exp} - M_{avg})^2} \quad (4)$$

ค่า Chi-Square (χ^2) หาได้จากสมการที่ 5 (Akpınar, E.K., 2008)

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (5)$$

เมื่อ M_{exp} คือ ค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง, M_{pre} คือ ค่าความชื้นที่ได้จากสมการ, M_{avg} คือ ค่าความชื้นเฉลี่ยของแต่ละอุณหภูมิทดลอง, N คือจำนวนข้อมูลทีวเคราะห์ และ z คือ จำนวนค่าคงที่

อัตราการอบแห้งคืออัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาณความชื้นต่อหน่วยเวลา สามารถคำนวณได้จากสมการ 6 (Kar, A. & Gupta, D.K., 2003)

$$DR = \frac{\text{น้ำที่ระเหยออก (g)}}{\text{เวลาอบแห้ง (min)}} \quad (6)$$

5. ความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (Specific energy consumption, SEC)

พลังงานจำเพาะในการอบแห้งดอกอัญชัน ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งทั้งหมดคือพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าของเครื่องอบแห้ง ได้แก่ ตัวทำความร้อนแบบไฟฟ้าและพัดลมดูดอากาศ สามารถหาค่าพลังงานไฟฟ้าด้วยวิธีวัดกระแสไฟฟ้า โดยใช้มิเตอร์ Uni-T รุ่น UT200D วัดค่ากระแสไฟฟ้าและนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้อบแห้งเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ถูกระเหยออกไปสามารถคำนวณค่าสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะได้จากสมการที่ 7 (Nadee, A. et al., 2012)

$$SEC = \frac{E_h + E_m}{m_i - m_f} \quad (7)$$

เมื่อ E_h คือ พลังงานไฟฟ้าตัวทำความร้อนแบบไฟฟ้า (J), E_m คือ พลังงานไฟฟ้ามอเตอร์พัดลมดูดอากาศ (J), m_i คือ น้ำหนักวัตถุดิบเริ่มต้น (g) และ m_f คือ น้ำหนักวัตถุดิบสุดท้าย (g)

ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

1. จลนพลศาสตร์การอบแห้งดอกอัญชัน

จาก Figure 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชื้นที่ระยะเวลาอบแห้งต่าง ๆ ในกระบวนการอบแห้งดอกอัญชัน ผลการทดลองพบว่า การอบแห้งดอกอัญชันเริ่มต้นอัตราการอบแห้งจะมีค่าสูง เนื่องจากเริ่มต้นอัญชันมีความชื้นสูงทำให้ลมร้อนสามารถระเหยน้ำได้ดี จากนั้นเมื่อเวลาการอบแห้งเพิ่มขึ้น ปริมาณความชื้นที่ผิวนอกดอกอัญชันลดลงซึ่งเกิดจากการส่งความชื้นจากภายในดอกอัญชันออกมายังผิวนอกได้ช้าลง ส่งผลให้การแลกเปลี่ยนอุณหภูมิอบแห้งและความชื้นที่ผิวนอก

ลดลง เป็นผลให้อัตราการอบแห้งมีค่าลดลงด้วย ซึ่งการทดลองอบแห้งดอกอัญชันมีลักษณะสอดคล้องกับรายงานการวิจัยของนักวิจัยอื่น ๆ เช่น การอบแห้งพริกไทย (Torpol, S. & Uengkimbuan, N., 2012) พักทอง (Doymaz, I., 2007) และปลานิล (Tumthong, P., 2011) เป็นต้น จากเงื่อนไขการทดลองอบแห้งดอกอัญชันที่อุณหภูมิ 50 60 และ 70°C กับความเร็วลม 1 และ 2 m/s พบว่าการอบแห้งดอกอัญชันด้วยความเร็วลม 1 และ 2 m/s อัตราการอบแห้งมีค่าเพิ่มขึ้น 62 % ที่อุณหภูมิ 60°C และ เพิ่มขึ้น 84 % ที่อุณหภูมิ 70°C ที่ความเร็วลมคงที่ 1 m/s เมื่อความเร็วลมอบแห้งเพิ่มขึ้น 2 m/s มีอัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 65 % แสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิและความเร็วลมมีอิทธิพลต่อการอบแห้งดอกอัญชัน

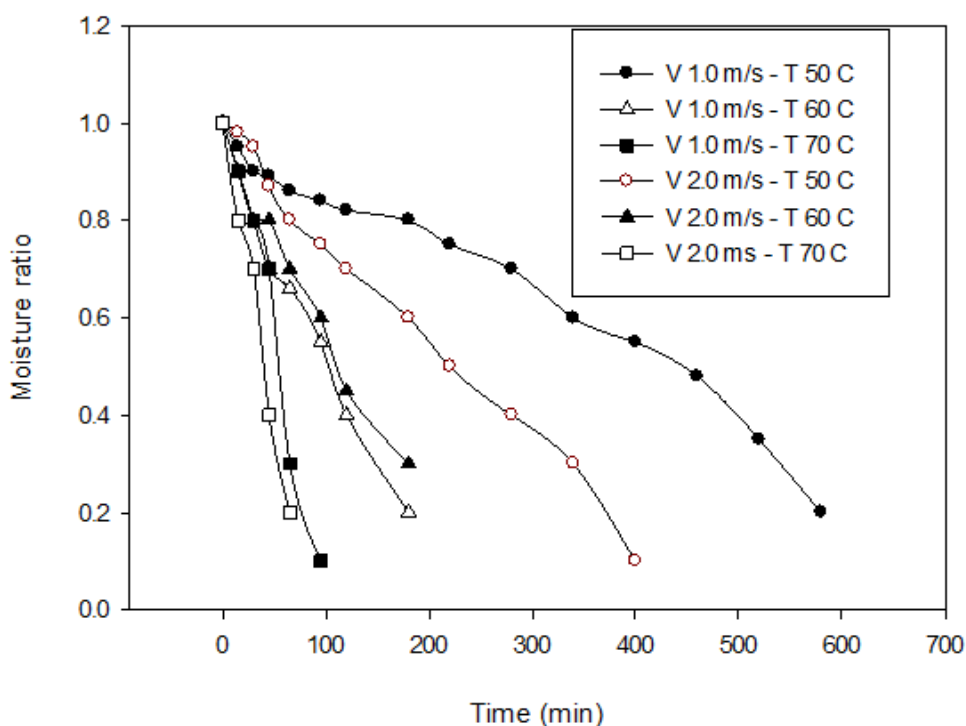


Figure 2 Relationship between the moisture content and drying time.

2. ค่าความสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าจำเพาะ

จาก Figure 3 แสดงค่าการใช้พลังงานในการทดลองอบแห้งดอกอัญชันที่เงื่อนไขการทดลองที่อุณหภูมิ 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70°C กับความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1 และ 2 m/s พบว่าอุณหภูมิและความเร็วลมต่างกันก็มีอิทธิพลต่อการอบแห้ง ดังจะเห็นได้ว่าภายใต้ความเร็วลมคงที่เดียวกัน อุณหภูมิที่สูงจะมีอัตราการอบแห้งที่สูงกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า ในขณะที่ภายใต้

อุณหภูมิเดียวกัน ความเร็วลมอบแห้งสูงก็จะมีอัตราการอบแห้งสูงกว่าความเร็วลมอบแห้งที่ต่ำกว่า เช่น การอบแห้งที่อุณหภูมิมอบแห้ง 50°C ร่วมกับความเร็วลม 2 m/s ระเหยน้ำได้ดีกว่าความเร็วลม 1 m/s ทำให้มีระยะเวลาการอบแห้งที่น้อยกว่าอย่างชัดเจน ทำให้ความเร็วที่สูงกว่าที่ค่าพลังงานจำเพาะที่น้อยกว่าความเร็วลมอบแห้งต่ำ ขณะเดียวกันที่อุณหภูมิมอบแห้ง 60°C ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิมอบแห้งและความเร็วลมที่ 1 m/s และ 2 m/s การถ่ายเทมวลและความร้อนมีความสามารถระเหยความชื้นที่ใกล้เคียงกัน ทำให้มีค่าการใช้พลังงานในการอบแห้งใกล้เคียงกันด้วย สำหรับการอบแห้งที่อุณหภูมิมอบแห้ง 70°C เนื่องจากอุณหภูมิมอบแห้งที่สูงทำให้ความชื้นที่ผิวนอกสูง ดังนั้น ความเร็วลมอบแห้งที่ 2 m/s จะสามารถระเหยความชื้นได้เร็วกว่าความเร็วลมอบแห้ง 1 m/s ทำให้มีค่าพลังงานอบแห้งที่ต่ำกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นว่าทั้งอุณหภูมิและความเร็วลมต่างกันก็มีอิทธิพลต่อการอบแห้งเหมือนกัน การลดระยะเวลาอบแห้งให้น้อยลงจะทำให้ค่าการใช้พลังงานไฟฟ้าในการอบแห้งลดลง ซึ่งพลังงานจำเพาะในการอบแห้งดอกอัญชันที่น้อยสุดมีค่าเท่ากับ 84.98 kJ/g ที่เงื่อนไขการอบอุณหภูมิมอบแห้ง 70°C ร่วมกับความเร็วลม 2 m/s แสดงให้เห็นการลดลงของค่าความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะเฉลี่ย 83.4% และ 57.5% ที่อุณหภูมิมอบแห้ง 60°C เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการอบแห้งด้วยอุณหภูมิมอบแห้ง 50°C

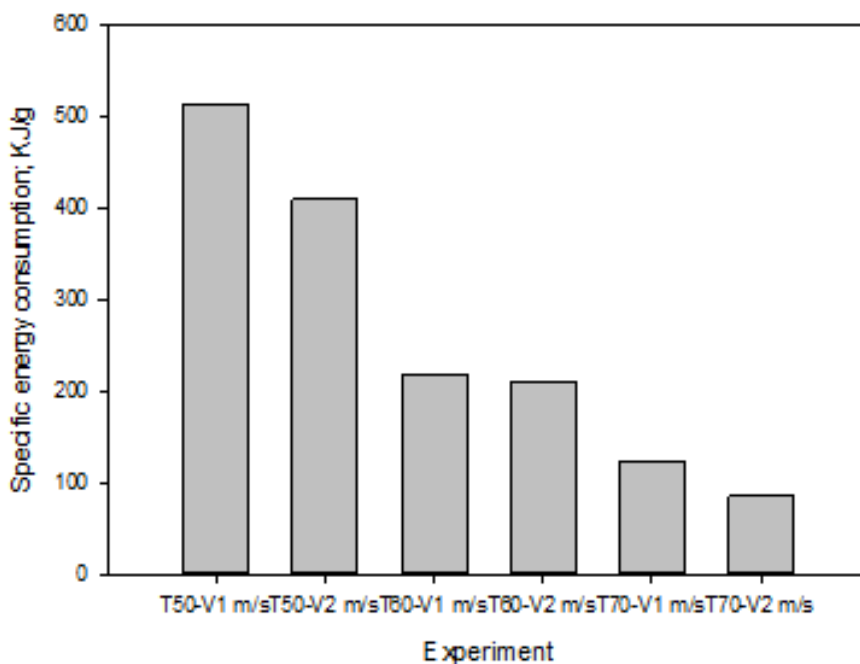


Figure 3 Energy consumption for drying Butterfly Pea Flower by hot air.

3. ผลของอุณหภูมิและความเร็วลมร้อน ที่มีต่ออัตราการอบแห้ง

จาก Figure 4 แสดงผลของอัตราการอบแห้งที่สภาวะการอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 3 ระดับ คือ 50 60 และ 70°C และความเร็วลม 2 ระดับ คือ 1 และ 2 m/s พบว่า อัตราการอบแห้งดอกอัญชัน จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิและความเร็วลมเพิ่มขึ้น กล่าวคือ อุณหภูมิและความเร็วของลมร้อนมีอิทธิพลต่อการอบแห้งดอกอัญชัน โดยอุณหภูมิลมร้อนที่สูงสามารถระเหยความชื้นที่ผิวดอกอัญชันได้ดีกว่าอุณหภูมิลมร้อนที่ต่ำ และความเร็วลมสามารถช่วยให้การระเหยของน้ำได้ดียิ่งขึ้น ทำให้อุณหภูมิลมและความเร็วลมที่สูงมีระยะเวลาการอบแห้งที่น้อยกว่า

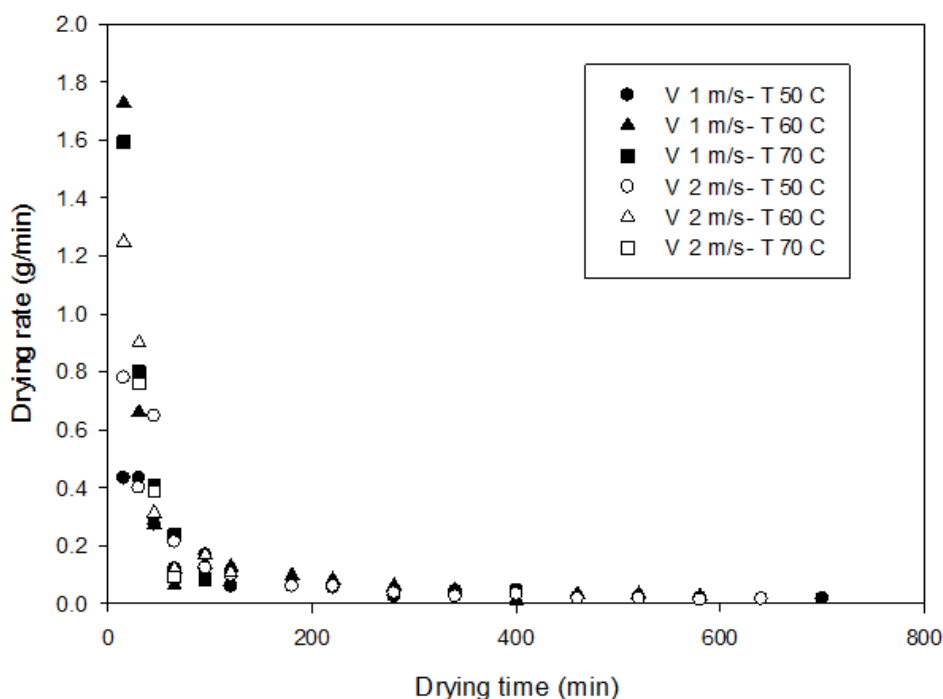


Figure 4 Relationship between drying rate and drying time.

4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการทางคณิตศาสตร์สำหรับการอบแห้งดอกอัญชัน ใช้การตัดสินใจความเหมาะสมสำหรับผลการทำนายอัตราส่วนความชื้นของการอบแห้งดอกอัญชัน ด้วยค่าสัมประสิทธิ์โคสแควร์ ที่มีค่าน้อยที่สุด χ^2 และ R^2 ที่มีค่ามากที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับนักวิจัยได้นำเสนอ (Luampon, R., 2018) ซึ่งผลที่ได้จากการประมวลจะแสดงใน Table 2

Table 2 Results for the drying kinetics described by mathematical models.

ลำดับ	สมการ อบแห้ง	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	R^2	χ^2
1	Lewis	1	50	0.952284488	0.072287700
			60	0.978202919	0.020643245
			70	0.923167455	0.093582505
		2	50	0.978087453	0.040166306
			60	0.984959819	0.012202886
			70	0.963856622	0.028960008
2	Page	1	50	0.938156206	0.047990784
			60	0.981433181	0.017612691
			70	0.987968433	0.015148305
		2	50	0.988609092	0.020990912
			60	0.987023112	0.010539772
			70	0.989659816	0.008393967
3	Henderson and pabis	1	50	0.954031191	0.069703802
			60	0.978420120	0.020439785
			70	0.935218073	0.079399198
		2	50	0.981532836	0.033909784
			60	0.985144170	0.012054431
			70	0.967172148	0.026347839
4	Logarithmic	1	50	0.973501394	0.040580949
			60	0.988436706	0.011007840
			70	0.979362136	0.025871544
		2	50	0.994592651	0.009994525
			60	0.987908024	0.009825424
			70	0.991101210	0.007229104

ลำดับ	สมการ อบแห้ง	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	R^2	χ^2
5	Two trem	1	50	0.953957811	0.069756320
			60	0.978420120	0.020439785
			70	0.935218073	0.079399198
		2	50	0.981532838	0.033909781
			60	0.985144171	0.012054431
			70	0.967172146	0.026347840
6	Verma et al.	1	50	0.971258613	0.043965604
			60	0.982763248	0.016361951
			70	0.978080253	0.026558456
		2	50	0.988933447	0.020396525
			60	0.987745891	0.009956355
			70	0.963856622	0.028960008
7	Wang and singh	1	50	0.984681336	0.023592469
			60	0.986771912	0.012582121
			70	0.982112054	0.022455411
		2	50	0.994963057	0.009311625
			60	0.987970239	0.009775177
			70	0.991593414	0.006830940

จาก Table 2 การประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ของสมการทางคณิตศาสตร์แบบชั้นบาง ทั้ง 7 สมการสำหรับทำนายผลการอบแห้ง โดยการตัดสินใจความเหมาะสมของสมการด้วยค่า χ^2 มีน้อยที่สุด และค่า R^2 มากที่สุด พบว่า สมการของ wang and singh มีค่าผลการทำนายผลที่ถูกต้อง และใกล้เคียงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองอบแห้งจริง ซึ่งจากการประมวลผลการทำนาย ได้ค่าตัวแปรคงที่ ดังแสดง Table 3

Table 3 Constant variables of wang and singh model from butterfly pea flowers drying prediction processing.

สมการอบแห้ง	ความเร็วลม (m/s)	อุณหภูมิอบแห้ง (°C)	ค่าคงที่
Wang and singh	1	50	a=-0.000841 b=0.000001
		60	a=-0.005526 b=0.000006
		70	a=-0.006807 b=-0.000032
	2	50	a=-0.002339 b=0.000000
		60	a=-0.005491 b=0.000009
		70	a=-0.011562 b=-0.000014

สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองอบแห้งดอกอัญชันด้วยลมร้อนภายใต้เงื่อนไขการทดลองอุณหภูมิลม 3 ระดับ คือ 50, 60 และ 80 °C และความเร็ว 2 ระดับ คือ 1 และ 2 m/s พบว่า อุณหภูมิที่ใช้อบแห้งและความเร็วลมมีผลต่ออัตราการอบแห้งของดอกอัญชันเช่นเดียวกัน ซึ่งการอบแห้งที่อุณหภูมิที่สูงสามารถช่วยลดระยะเวลาการอบแห้งทำให้ค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะในการอบแห้งมีค่าลดลง โดยการอบแห้งด้วยความเร็วลม 2 m/s การอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 70 °C มีพลังงานจำเพาะลดลงเท่ากับ 21 % และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าพลังงานจำเพาะลดลงเท่ากับ 53 % เมื่อเทียบกับ การอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 50 °C สำหรับการอบแห้งที่ความเร็วลม 1 m/s การอบแห้งด้วยอุณหภูมิลมร้อน 70 °C มีพลังงานจำเพาะลดลงเท่ากับ 24 % และการอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 °C มีค่าพลังงานจำเพาะลดลงเท่ากับ 54 % เมื่อเทียบกับ การอบแห้งด้วยอุณหภูมิ 50 °C โดยค่าพลังงานไฟฟ้าจำเพาะสูงสุดสำหรับการทดลองการอบแห้งด้วยคือ การอบแห้งที่อุณหภูมิลมร้อน 50 °C ร่วมกับความเร็วลม 1 m/s มีค่าพลังงานจำเพาะเท่ากับ 514 kJ/g สำหรับผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สมการที่สามารถวิเคราะห์ทำนายผลการอบแห้งดอกอัญชันที่ดีที่สุด คือ สมการ Wang and singh มีค่า R^2 ระหว่าง 0.987970239 ถึง 0.994963057 และค่า χ^2 ระหว่าง 0.006830940 ถึง 0.009775177

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่ให้การสนับสนุนพื้นที่ในการทดลอง และขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการทำให้การวิจัยผ่านไปด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ เครื่องมือ และผู้ที่ให้ความช่วยเหลือทำให้งานวิจัยนี้ผ่านไปด้วยดี

References

- Azmi, S.K. & Ibrahim, D. (2020). Mathematical Modeling and Drying Characteristics Investigation of Black Mulberry Dried by Microwave Method. *Internation Journal of Fruit Science*, 20, 1222-1233.
- Akpinar, E.K. (2008). Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. *Journal of Mechanical science and technology*, 22, 1544-1553.
- Akpinar, E.K. & Bicer, Y. (2008). Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. *Journal of Energy Conversion and Management*, 88(49), 1367–1375.
- Akpainar, E.K. et al. (2003). Thin layer drying of red pepper. *Journal of Food Engineering*, 59(1), 99-104.
- Diamante, L.M. et al. (2010). A new mathematical model for thin layer drying of fruits. *International Journal of Food Science and Technology*, 45 (9), 1956-1962.
- Doymaz, I. (2007). The kinetics of forced convective air-drying of pumpkin slices. *Journal of Food Engineering*, 79, 243-248.
- Doymaz, I. (2005). Sun drying of figs: an experimental study. *Journal of Food Engineering*, 71, 403-407.
- Havananda, T. & Leungwliai, K.. (2019). Effect of Harvest Time and Season on Antioxidant Activity, Anthocyanin and Total Phenolic Content of Butterfly Pea Flower. *King Mongkut's Agricultural Journal*, 37 (4), 655-661.
- Jalal, D. et al. (2018). Multi-stage continuous and intermittent microwave drying of quince fruit coupled with osmotic dehydration and low temperature hot air drying. *Journal of Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 45, 132-151.
- Kashaninejad, M. et al. (2007). Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. *Journal of Food Engineering*, 78, 98–108.
- Kar, A., & Gupta, D.K. (2003). Air drying of osmosed button mushroom. *Journal of Food Science and Technology*, 40(1), 23-27.
- Luampon, R. (2018). Thin Layer Drying Model of Carrot Using a Heat Pump Vacuum Dryer. *Journal of KMUTNB*, 28, 147-155.
- Midilli, A., Kucuk, H., & Yapar, Z. (2002). A new model for single- layer drying. *Journal of Drying Technology*, 20(7), 1503-1513.
- Nadee, A. et al. (2012). Drying Kinetics of Pandanus Leaf by Infrared Radiation Combine Hot Air and Hot Air. *Burapha Science Journal*, 17, 86-94.

- Togrul, I.T., & Pehlivan, D. (2002). Mathematical modeling of soar drying of apricots in thin layers. *Journal of Food Engineering*, 55, 209-216.
- Torpol, S. & Uengkimbuan, N. (2012). A Study on Drying Kinetics of Peppers Using Hot Air Dryers. *Agricultural Science Journal*, 43, 107-110.
- Tumthong, P. et al. (2011). Study on Drying Behavior of Tilapia nilotica Using Hot Air. *Agricultural Science Journal*, 42, 573-576.
- Saniso,*E. & Kasa, M. (2009). Thin Layer Drying of Garcinia atroviridis Slice : Drying Kinetic Model and Diffusion Coefficient. *Burapha Science Journal*, 14, 26-33.
- Wang, C.Y., & Singh R.P. (1978). *A single layer drying equation for rough rice*. ASAE paper. No. 78-3001, St Joseph, Michigan.
- Zhao, R. & Gao, T., (2016). Research Progress of Hot Air Drying Technology for Fruits and Vegetables. *Journal of Food Science and Technology* .10(3): 160-166.